

Prirodno-matematički fakultet  
Novi Sad

Odsek: Fizika  
Smer: Astronomija sa astrofizikom  
Kurs: Astrofizika sunca  
Profesor: Dr Igor Savić

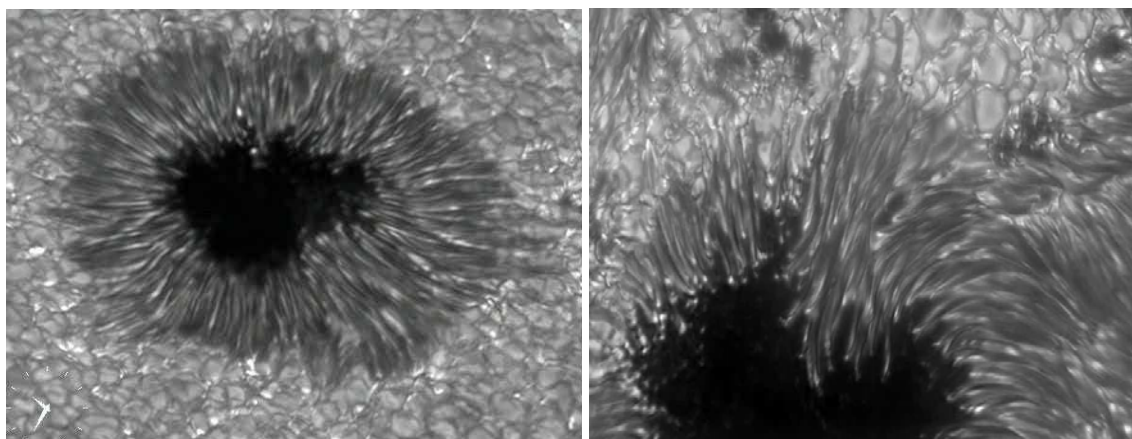
Tema seminarskog rada:  
Fina struktura sunčevih pega

Student: Miloš Mitrović

## Sunčeve pege

Sunčeve pege su jedna od najuočljivijih manifestacija solarnog magnetnog polja. Njihovo postojanje je bilo poznato još u drevnoj Kini.. Ali za zapadnu civilizaciju one su bile otkrivene od strane Fabriciusa, Heriota, Galileja i drugih oko 1610 godine, u vreme kada je tek novo-otkriveni teleskop bio upotrebljen na Suncu.

Još je u to vreme uočeno da se pege sastoje iz dve oblasti, tamnije nazvane *umbra* (senka), okruženom svetlijom oblasti nazvanom *penumbra* (polusenka). Danas, novije generacije solarnih teleskopa omogućavaju posmatranje sunčevih pega sa ugaonom rezolucijom od 0.12-0.20 lučnih sekundi (oko 90-150 kilometara). Što omogućava proučavanje njihove fine strukture.



(Sl. 1)

*Fina struktura sunčeve pege*

**The fine structure of the sunspot penumbra**

Taken with the Dutch Open Telescope (DOT) operating at the Spanish observatory of Roque de los Muchachos (La Palma, Tenerife)

Danas je prihvaćeno da se pege formiraju usled dejstva cevi magnetnog fluksa (smeštenih u oblasti izmedju radijativne i konvektivne zone) koje se uzdižu kroz konvektivnu zonu sve dok ne izadju na površinu sunca (tj. fotosferu) kada dolazi do formiranja pege.

## Umbra

Umbra obuhvata centralni tamniji deo pege, u noj deluje jako gotovo vertikalno magnetno polje koje se suprotstavlja konvektivnom transportu energije, pritom spuštajući temperaturu pege na  $T_{umb}(\tau = 1) = 3500 - 5000$  K čineći je tamnijom od ostalog dela fotosfere, gde je  $T_{pho}(\tau = 1) = 6000 - 6500$  K. U umbri srednje magnetno polje je orijentisano vertikalno u odnosu na sunčevu površinu, postajući blago nagnuto kako se približava granici izmedju umbre i penumbre. Jačina magnetnog polja senke kreće se izmedju  $B_{umb} = 2000-3500$  Gauss, dostižući najveće vrednosti kod velikih pega. Osim

nekim oscilatornim fenomenima za senku je nadjeno da se nalazi u stanju mirovanja, ( crveno-plava pomeranja su pronadjena na spektralnim linijama merenim na senci).

Fina struktura senke je uglavnom sastavljena od takozvanih *umbralnih tačaka*, one predstavljaju svetle zaobljene oblasti sa tipčnom veličinom između 0.2-0.5 lučnih sekundi. Smatra se da su one toplije od prosečne temperature senke. Generalno one se smatraju nekom vrstom konvektivnog fenomena i mnogi pokušaji, sa kontraverznim rezultatima, su bili učinjeni da bi se utvrdilo da li one prenose bilokakav tok ili ne. Prema njihovoj relativnoj poziciji u senci tačke su razvrstane na centralne i periferne. Poznato je da centralne tačke ostaju stacionarne dok periferne migriraju od spoljnih ka unutrašnjim delovima senke. Nihova tačna veza sa zrnastim strukturama u polusenci nije sasvim jasna.

## Umbralne tačke

Proučavanje umbre i varijacija u njihovoj strukturi igraju ključnu ulogu u razumevanju energetskog transporta u sunčevim pegama. Tačkaste strukture unutar senke nose informacije o strukturi magnetnog polja i termalnom stanju slojeva koji se nalaze blizu površine senke. Prema nekim modelima Umbralne tačke su vidljive posledice koherentnog kretanja u konvektivnim ćelijama prečnika od 250-300 Km koje dostižu dubinu od oko 1500 Km.

Takozvani *klaster model* polazi od pretpostavke da se magnetno polje sunčeve pege razdvaja ispod vidljivog dela fotosferske senke na nekoliko zasebnih snopova fluksa. Pri konvektivnom kretanju plazma može dospeti u region između ovih snopova fluksa i zatim biva izbačena u vidu stuba vrelog gasa. Dok bi magnetno polje unutar umbralne tačke trebalo biti veoma smanjeno na vidljivom delu površine.

Širok raspon sjaja i temperatura merenih umbralnih tačaka ukazuju na postojanje više različitih vrsta tačaka. Spetroskopija je omogućava dobijanje podataka o jačini magnetnog polja unutar umbre. Pri posmatranjima srednjom prostornom rezolucijom ( $\geq 1''$ ), umbralne tačke pokazuju nešto slabiju jačinu polja nego okolna umbra. Ovo slabljenje jačine polja se kreće od oko 100 Gauss pa do skoro 50%. U novijim istraživanjima je napravljena podela na centralne i periferne umbralne tačke. Smanjenje polja kod centralnih se kreće u opsegu od 10 – 20 %, dok kod perifernih umbralnih tačaka ono iznosi 5 – 10 %.

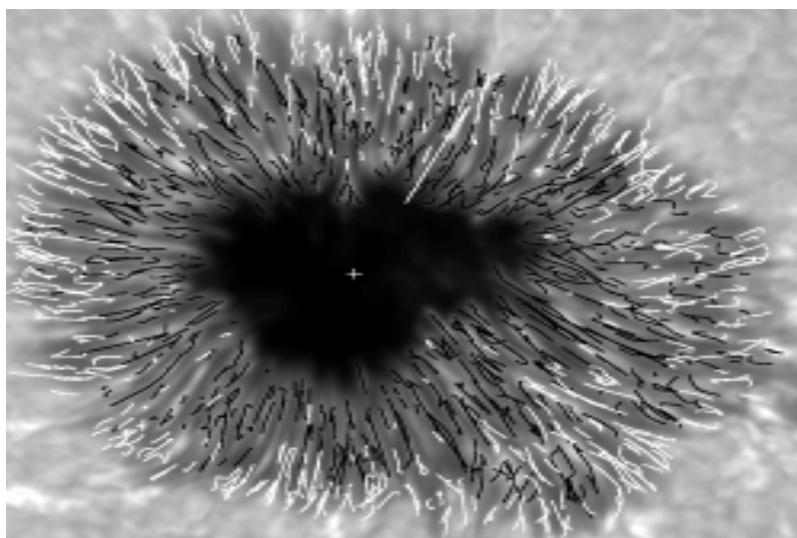
## Penumbra

I ako je umbra dosta posmatrana mnogi fenomeni vezani za nju ostali su nepoznati. Fina struktura penumbre je uglavnom okarakterisana naizmeničnim radijalno raspoređenim svetlim i tamnom vlaknima. U polusenci osim vlaknaste postoji i zrnasta struktura koja se kreće radijalno unutar penumbre (oko umbre). Njihova tipična brzina je u opsegu od  $0.5 - 1 \text{ Km s}^{-1}$ . Smatra se da na strukturu polusenke najviše utiče magnetno polje pege.

Jedan od glavnih nerešenih problema predstavlja sjajnost polusenke koja je znatno sjajnija u odnosu na senku sunčeve pege, čak 75 %. Ako se uzme u obzir da i kod polusenke dolazi do znatnog usporjenja konvektivnog kretanja usled delovanja magnetnog polja koje samo neznatno slabije nego kod senke.

## Zrnasta struktura penumbre

Svetle vlaknaste strukture u polusenci sunčeve pege predstavljaju lance svetlih karaktera nazvanih penumbralna zrna. Penumbralna zrna su dinamični objekti, ali postoje određena neslaganja u pogledu trajanja njihovih života i njihovog horizontalnog kretanja. Postoje primeri u kojima je otkriveno trajanje života od 1 – 3 sata sa kretanjem uglavnom prema umbri. Dok drugi primeri ukazuju na horizontalni tok ka spolja, spoljna kretanja (prema fotosferi) u spoljnim delovima penumbre. Detektovana su oba, unutrašnja i spoljašna, kretanja penumbralnih zrna sa znatno kraćim srednjim vremenom života: 39 minuta za one sa unutrašnjim i 25 za one sa spoljašnjim kretanjima. Pronađena je i linija razdvajanja u penumbri koj se nalazi aproksimativno na oko 70 % rastojanja od umbre do fotosfere većina penumbralnih zrna izvan ove linije se kreće prema fotosfri, dok one koje se nalaze unutar ove linije uglavnom se kreću ka umbri.



(Sl 2)

*Trajektorije penumbralnih zrna koja se kreću ka unutra (crne) i koje se kreću ka spolj (bele)*

**Fine structure in sunspots**

## Model cevi magnetnog fluksa unutar penumbre

Pretpostavimo da se magnetni fluks polusenke fragmentiše na cevi magnetnog fluksa. Te cevi zauzimaju značajno mesto u procesima unutračnje konvektivne razmene i razvijaju se veoma dinamični unutar penumbre. Penumbra se sastoji od ansambala ovakvih cevi. Da bi se razumela penumbra kao takva, posmatra se jedna izdvojena cev magnetnog fluksa po modelu JS (JAHN & SCHMIDT).

Dinamička evolucija jedne cevi magnetnog fluksa je opisana uz pomoć nekoliko aproksimacija, zanemarena je magnetna difuznost i pretpostavljeno je da se nijedna promenljiva ne menja duž radijusa cevi već samo njenom dužinom. Tako se dobija šema jednodimenzionalne cevi na dvodimenzionalnoj pozadini (okolini). Kao nezavisna promenljiva uzima se integrisana masa  $\rho$ , duž cevi. Još je pretpostavljeno da cev trenutno dostiže totalnu ravnotežu pritiska sa svojom okolinom:

$$p(a,t) + \frac{B^2(a,t)}{8\pi} = p_b(a,t) + \frac{B_b^2(a,t)}{8\pi}$$

Ovde  $p$  i  $B$  označavaju gasni pritisak i silu magnetnog polja, dok indeks  $b$  predstavlja lokalne pozadinske promenjive.

Slika 4a predstavlja početno stanje modela. Magnetni fluk cevi iznosi  $\phi = 2 \times 10^{16}$  Mx, taj deo cevi se nalazi u kontaktu sa unutrašnjim toplijim delom sunca. Kao najniža granična vrednost, najmanji maseni element cevi ostaje fiksiran na dubini od  $z = -15$  Mm i na radijalnom rastojanju od centra sunčeve pege  $x = 5$  Mm. Gornji kraj cevi, počinje na  $x = 25$  Mm i  $z = 400$  Km. Slika pokazuje i oblik cevi (sa 12 puta uvećanim prečnikom radi boljeg pregleda). Nivo  $z = 0$  Km odgovara nivou fotosfere sunca.

Slike 4b i 4c predstavlja naredna stanja u evoluciji cevi. Osenčeni delovi predstavlja brzinu toka duž cevi.

Deo cevi koji je u kontaktu sa unutrašnjim toplijim slojevima sunca biva zagrevan zračenjem, pritom se širi, postaje redji u odnosu na okolinu, i usled potiska se izdiže. Iznad fotosfere, cev prestaje sa uzdizanjem, dok se gustina cevi povećava usled radijativnih gubitaka. Pojavljuje se tačka preseka cevi sa fotosferom koja migrira prema umbri kao i podfotosferski deo cevi.

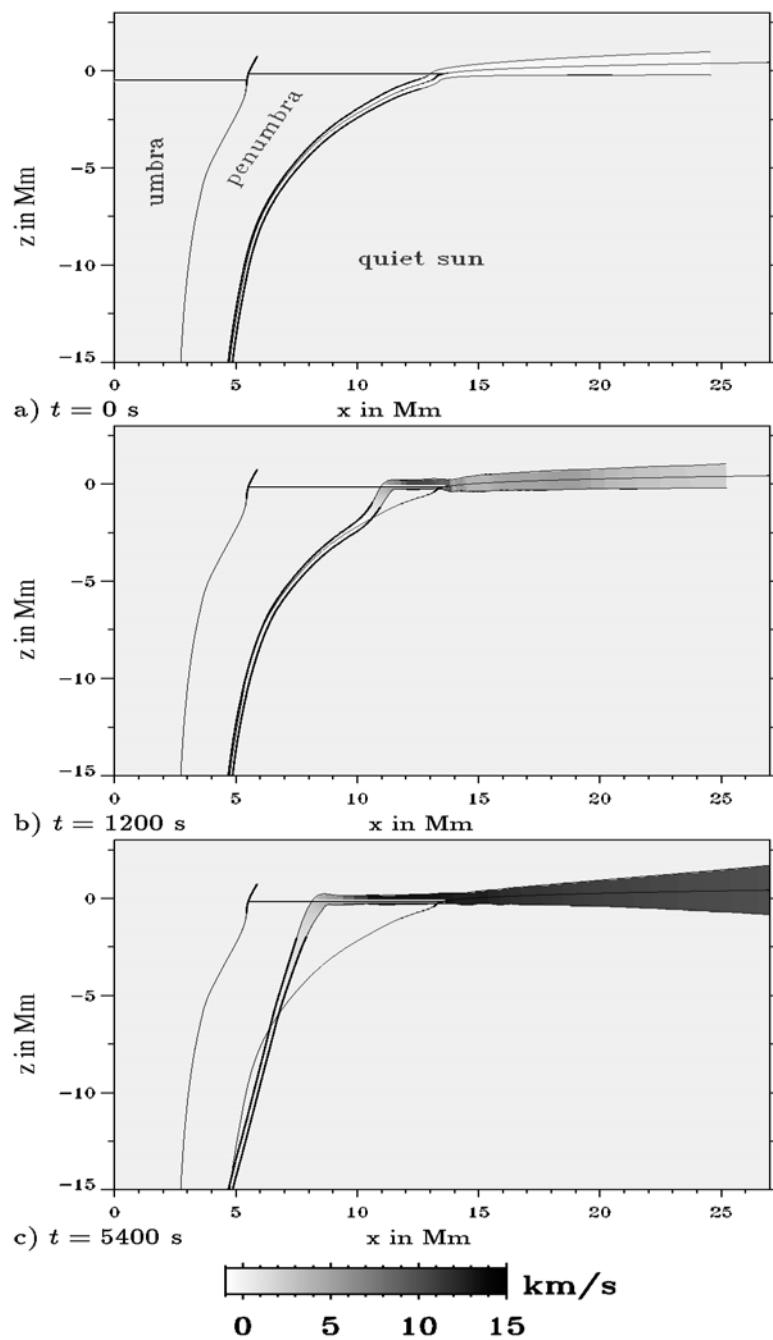
Sile koje deluju normalno na cev su potisak  $\vec{n} \cdot \mathbf{g}(\rho - \rho_b)$ , magnetni napon  $kB^2/4\pi$ , i

gradijent pozadinskog magnetnog pritiska,  $-\frac{\vec{n} \cdot \nabla B_b^2}{8\pi}$  ( $\rho$  i  $B$  predstavlja gustinu i jačinu magnetnog polja, respektivno,  $\mathbf{g}$  predstavlja gravitaciju na sunčevoj površini,  $k$  je mera

krivine cevi, sa  $\vec{n}$  je označen jedinični vektor normale na cev).

Aproksimativno 100 Km iznad penumbre, cev pronalazi ravnotežu u vidu horizontalnog kanala u kojoj je sila antipotiska (gustina cevi je 10 % veća od gustine okoline) balansirana uz pomoć gradijenta pozadinskog magnetnog pritiska usmerenog naviše.

Pozadinski magnetni pritisak opada veoma malo u odnosu na pozadinski gasni pritisak, koji opada eksponencijalno. Plazma unutar cevi se širi dok se uzdiže, zbog toga što je magnetni fluks zatvoren duž cevi, magnetni pritisak unutar cevi opada.



(Sl 4)

*Oblik jedne magnetne cevi prikazane za  $t = 0$ , 1200, i za 5400 s. Umbra i penumbra su odvojene peripatopauzom, penumbra, i Sunce magnetopauzom. Horizontalna linija unutar penumbre predstavlja fotosferu penumbre. Siva skala pokazuje brzinu toka duž cevi. Radijus cevi je uvećan 12 puta radi bolje preglednosti slike.*

(A DYNAMICAL MODEL FOR THE PENUMBRALE FINE STRUCTURE AND THE EVERSHEDE EFFECT IN SUNSPOTS)

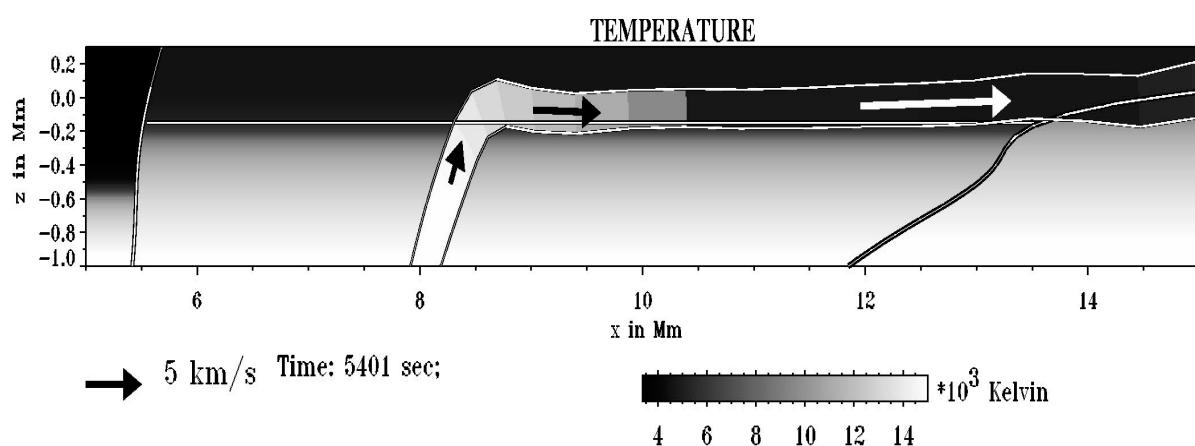
Na drugoj granici polusenke, iznad fotosfere, cev se više ne uzdiže naviše, i u cevi ne dolazi do promene gasnog pritiska. Sve dok je spoljašnji pritisak iznad fotosfere približno konstantan u toj horizontalnoj ravni, gradijent gasnog pritiska,  $\delta p / \delta a$ , se razvija duž horizontalnog dela cevi. Kao posledica javlja se tok plazme ka spolja, sve dok gravitacija ne može da se suprostavi gradijentu pritiska u horizontalnoj cevi. To znači da

se cev uzdiže kroz podfotosferski sloj polusenke, dužinski tok se razvija upravljen navise ispod fotosfere i horizontalno iznad fotosfere.

Kako nagib podfotosferskog dela cevi postaje strmiji, potisak se smanjuje i tačka preseka cevi i fotosfere prestaje da migrira ka penumbri. Slika 4c pokazuje cev nakon 5400 s. Na njoj se vidi da je presek cevi sa fotosferom imao prvobitnu poziciju  $x = 13.5$  Mm, dok nakon što je migrirao ima poziciju  $x \approx 8.5$  Mm.

Kada jednom plazma dostigne temperaturnu ravnotežu sa okolinom, ona postaje optički tanka ( $\tau \approx 10^{-1}$ ). Izmedju tačke preseka cevi sa fotosferom i tačke temperaturne ravnoteže, gasni pritisak unutar cevi opada usled radiativnih gubitaka. Zbog ovog gradijenta pritiska unutar cevi, tok plazme se ubrzava od  $3 \text{ Km s}^{-1}$  kod tačke preseka sa fotosferom pa do brzine od  $14 \text{ Km s}^{-1}$  kod druge granice polusenke.

Na slici 5 se nalazi uveličana slika jedne cevi, koja je uzdignuta oko 100 Km iznad penumbralne fotosfere, u vremenskom trenutku  $t = 5400$  s. Ovde osenčena skala predstavlja temperaturu cevi i njene okoline. Dužina strelica u cevi srazmerne su brzini toka duž cev. Radijus cevi je uvećan za faktor 6.



(Sl 5)

Ova slika pokazuje cev za  $t = 5400$  s, u blizini površine. Horizontalna linija  $z = -150$  Km predstavlja fotosferu penumbre. Siva skala predstavlja temperaturu cevi i okruženja. Na levoj strani hladnija umbra, a na desno toplije sunce. Prečnik cevi je uvrćan za faktor 6. Strelice predstavljaju dužinsku brzinu toka.  
(A DYNAMICAL MODEL FOR THE PENUMBRAL FINE STRUCTURE AND THE EVERSHED EFFECT IN SUNSPOTS)

### Nastanak zrnaste strukture polusenke delovanjem magnetnih cevi

Tok u podfotosferskim delovima cevi donosi na površinu vrelu plazmu, što ima za posledicu da otisak preseka cevi sa fotosferom izgleda svetlo. Na otisku, brzina toka plazme iznosi oko  $3 \text{ Km s}^{-1}$ . Zrnasta struktura polusenke može biti objašnjena uz pomoć ovakvih otisaka, jer su otisci topliji i svetliji od okoline i migriraju prema umbri. Takođe usled visoke temperature, optička debljina cevi koja odgovara prečniku cevi na samom otisku iznosi  $\tau \approx 10^3$ , ukazujući na to da bi penumbralna zrna trebala biti optički tanka.

## **Svetla vlakna polusenke**

Od otiska, plazma plazma ističe horizontalno ka spolja i pritom se postepeno hladi usle radijativnih gubitaka. U odredjenoj tački tok plazme u cevi dostiže temperaturu ravnoteže sa okolinom.

Horizontalni deo cevi koji je topliji od okoline može biti identifikovan kao trag penumbralnog zrna. Ovaj deo je tamniji nego sam otisak zato što je hladniji. On takodje biva sve više sabijen kako plazma gubi unutrašnju energiju, i cev postaje tanja. Po ovom modelu svetla vlakna su tragovi koji ostaju iza penumbralnih zrna.

## **Tamna vlakna polusenke**

Sve dok je u cevi toplija od okolne atmosfere, nena neprozirnost raste zbog temperature zavisnosti neprozirnosti  $H$ . To znači da je cev optički debela sve dok je topla. Kada tok plazme unutar cevi dostigne temperaturnu ravnotežu, ona postaje transparentna ( $\tau \approx 10^{-1}$ ) kao i atmosfera na istoj visini. Duzina vlakana zavisi od brzine hladjenja plazme. Tanje cevi imaju manju optičku debljinu i hlde se puno efikasnije, kreirajući pritom kraća svetla vlakna.

Prema ovom modelu, tamna vlakna sama po sebi ne postoje već su izazvana optički debljim svetlim vlaknima koja delimično prekrivaju tamniju penumbralnu fotosferu.

Prostor između dva susedna svetla vlakna koja se radijalno pružaju iznad izgleda kao tamno vlakno.

## **Literatura:**

### **Some properties of sunspot umbral dots**

**A. Tritschler and W. Schmidt**

Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik, Schöneckstr. 6, D-79104 Freiburg, Germany

Received 1 April 1996 / Accepted 16 October 1996

### **The fine structure of the sunspot penumbra**

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades

der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultäten

der Georg-August-Universität zu Göttingen

vorgelegt von

Juan Manuel Borrero Santiago

aus Algeciras / Cádiz / España

Göttingen 2004

### **Fine structure in sunspots**

#### **IV. Penumbral grains in speckle reconstructed images**

M. Sobotka<sup>1</sup> and P. Sütterlin<sup>2</sup>

### **A DYNAMICAL MODEL FOR THE PENUMBRAL FINE STRUCTURE AND THE EVERSLED EFFECT IN SUNSPOTS**

R. Schlichenmaier<sup>1</sup>

Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik, 85748 Garching, Germany

K. Jahn

Warsaw University Observatory, Al. Ujazdowskie 4, 00-478 Warsaw, Poland; [crj@astrouw.edu.pl](mailto:crj@astrouw.edu.pl)  
and

H. U. Schmidt

Max-Planck-Institut für Astrophysik, 85748 Garching, Germany

*Received 1997 September 26; accepted 1997 December 1; published 1998 January 14*